

倾斜长周期光纤光栅的折射率传感特性

王金豆,葛海波,李彩虹,侯元萌

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:为给倾斜长周期光纤光栅在折射率传感领域的合理应用提供理论参考,通过光学仿真软件分别模拟了不同包层模式、不同包层半径情况下有效折射率及谐振波长漂移量的变化规律。仿真结果表明:光栅各阶包层的有效折射率均会随环境折射率的增大而增大,且半径越小的包层模式灵敏度越高;根据谐振波长漂移量与环境折射率的变化规律,在实际应用中可以选择不同的参数来满足不同的灵敏度需求。

关键词:倾斜长周期光纤光栅;折射率传感;灵敏度;谐振波;环境折射率

中图分类号:TN257 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)04-0023-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Refractive index sensing characteristics of tilted long period fiber grating

WANG Jindou, GE Haibo, LI Caihong, HOU Yuanmeng

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to provide a theoretical reference for the rational application of tilted long period fiber grating in the field of refractive index sensing, the variation rule of effective refractive index and wavelength drift of resonant wave under different cladding modes and different cladding radius are simulated by optical simulation software. The simulation results show that the effective refractive index of each cladding of the grating increases with the increase of the refractive index of the environment, and higher order cladding modes with smaller radius have higher sensitivity. According to the variation rule of the wavelength shift of the resonant wave and the refractive index of the environment, different parameters can be selected in practical applications to meet different sensitivity requirements.

Key words: tilted long period fiber grating; refractive index sensing; sensitivity; resonant wave; environmental refractive index

0 引言

折射率传感技术是目前研究光纤光栅传感的热门议题,折射率作为一个基本的光学参量,它的测量在各行各业都有着巨大的用途,所以光纤光栅折射率传感器正处于不断深入的研究之中^[1]。根据光纤光栅的周期长短不同,可将周期性的光纤光栅分为短周期($\Lambda < 1 \mu\text{m}$)和长周期($\Lambda > 1 \mu\text{m}$) 2类^[2],小于 $1 \mu\text{m}$ 的短

周期光纤光栅称为光纤布喇格光栅,光纤布喇格光栅对环境折射率并不敏感,虽然可以利用腐蚀包层的方法测量折射率^[3],但这种方法同时也会降低光纤的机械强度;而周期为几十至几百微米的长周期光纤光栅(LPFG),其同向传输的纤芯基模会与包层模发生耦合,无后向反射,LPFG较光纤布喇格光栅而言,具有更高的折射率灵敏度,其谐振波长容易受到环境折射率的影响^[4,5]。国内外关于折射率传感器的研究已有很多,但大多是关于 LPFG 的传感器研究^[6-9]。目前,国内外关于倾斜长周期光纤光栅(TLPFG)传感特性研究的还很少,而 TLPFG 由于其光栅波矢方向和轴向之间存在一定的夹角(夹角使得光栅包层模与纤芯模之间的耦合加强),与普通的 LPFG 相比,倾斜角度可以根据需求灵活改变^[10]。基于这种原理,本文研究 TLPFG 的折射率传感特性。

收稿日期:2019-10-11。

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2011JM8038)资助。

作者简介:王金豆(1995—),女,硕士研究生,现就读于西安邮电大学电子工程学院电子科学与技术学科物理电子学专业,主要从事于光电子器件以及光纤光栅解调方面的研究。本科期间曾获校二、三等奖学金、全国大学生数学竞赛二等奖,研究生期间曾获二等奖学金和“互联网+”创新创业大赛校三等奖。



1 理论分析

TLPFG 的结构图如图 1 所示。

θ 为 TLPFG 光栅波矢方向与轴向之间的倾角, Λ 为光纤的轴向周期, 倾斜栅面的

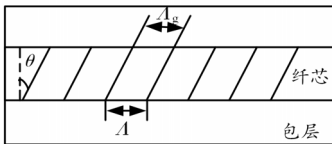


图 1 TLPFG 结构示意图

距离为 Λ_g , 且满足 $\Lambda_g = \Lambda \cos \theta$ 。

TLPFG 中的模式耦合关系可以用如下耦合模方程^[10]表示:

$$\frac{dA_{co}}{dz} = i f_{co-co} A_{co} + i \sum_{l,m} g_{lm-co}^+ A_{lm} \exp(-2i\delta_{lm-co}z) \quad (1)$$

$$\sum_{l,m} \frac{dA_{lm}}{dz} = \sum_{l,m} \left[i A_{lm} f_{lm-lm} + i g_{lm-co}^- A_{co} \exp(2i\delta_{lm-co}z) \right] \quad (2)$$

其中, i 为虚数单位, A_{co} 为纤芯模的振幅, A_{lm} 为第 l 阶 m 次包层模的振幅, δ_{lm-co} 为纤芯模与第 l 阶 m 次包层模的解调参量, f_{co-co} , f_{lm-lm} 和 $g_{lm-co}^{\pm}$ 分别为纤芯模与纤芯模之间、包层模与包层模之间和包层模与纤芯模之间的互耦合系数。由于折射率调制与纤芯模有关, 因此包层模与包层模之间的互耦合系数 f_{lm-lm} 可以近似忽略不计。 f_{co-co} , $g_{lm-co}^{\pm}$ 和 δ_{lm-co} 的计算公式分别为:

$$f_{co-co} = \frac{\omega}{2} \varepsilon_0 n_{co}^2 \delta(z) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{a_{co}} r dr \left(E_r^{co} E_r^{co*} + E_{\varphi}^{co} E_{\varphi}^{co*} \right) \quad (3)$$

$$g_{lm-co}^{\pm} = \frac{\omega}{4} \varepsilon_0 n_{co}^2 \delta(z) v \times \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{a_{co}} \times \exp(\pm 2iK_g r \cos \varphi \sin \theta) \left(E_r^{cl} E_r^{co*} + E_{\varphi}^{cl} E_{\varphi}^{co*} \right) \quad (4)$$

$$\delta_{lm-co} = \frac{1}{2} (\beta_{co} - \beta_{lm} - 2K_g \cos \theta) \quad (5)$$

其中, r, φ, θ 分别代表球坐标系下的坐标位置, ω 为光波角频率, n_{co} 为纤芯的折射率, a_{co} 为纤芯的半径, ε_0 为真空中的介电常数, $\delta(z)$ 为在 z 处的纤芯折射率的变化量, E_r 和 E_{φ} 分别为模式场的径向分量和切向分量, v 表示条纹可见度, $K_g = \frac{\pi}{\Lambda_g}$, β_{co} 为纤芯模传播常数。 β_{lm}

为第 l 阶 m 次包层模的传播常数, 且 $\beta_{co} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{co}^{co}$, $\beta_{lm} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{co}^{lm}$ 。当解调参数 $\delta_{lm-co} = 0$ 时, 即满足 TLPFG 的相位

匹配条件, 得到谐振波长 $\lambda = \left[n_{co}^{co}(\lambda) - n_{co}^{lm}(\lambda) \right] \Lambda$, n_{co}^{co} , n_{co}^{lm} 分别为纤芯模、包层模的有效折射率, 有效折射率可以通过求解多层圆柱光纤光栅的特征方程求得。从式(4)

可以看出, TLPFG 的 $g_{lm-co}^{\pm}$ 与 θ 有关, 对给定波长处的谱透率产生影响。

2 数据仿真及结果分析

本文根据 TLPFG 折射率传感基本原理, 采用数值模拟的方法, 通过光学仿真软件 OptiGrating 对 TLPFG 的传感特性进行了仿真, 设置各结构参量的数值如下: 纤芯半径为 $4.15 \mu\text{m}$, 折射率为 1.44921; 包层半径为 $60 \mu\text{m}$, 折射率为 1.44403; 模拟环境介质的半径理论上为无穷大, 方便起见, 将其设为 $200 \mu\text{m}$, 折射率为 1; 倾角 θ 设置为 80° , 光栅长度 L 为 $50000 \mu\text{m}$, 折射率调制深度 n 为 0.0001, 光栅周期为 $450 \mu\text{m}$ 。

为研究环境折射率对于包层折射率的影响, 分别讨论了不同包层模式在不同环境折射率下随包层半径变化的规律。设置环境折射率为 1.35, 包层半径从 $5 \mu\text{m}$ 开始, 以 $2.5 \mu\text{m}$ 的步长逐渐增加至 $60 \mu\text{m}$, 记录此过程中不同包层模式的有效折射率, 并绘制变化曲线如图 2

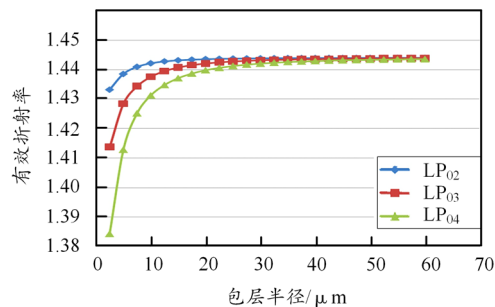


图 2 不同包层模式的有效折射率与包层半径的关系

所示。可以

看出, 同一

包层模的

有效折射

率均随包

层半径的

增大而增

大, 且呈非

线性改变;

当包层半径较小时增长比较明显、斜率较大, 说明半径更小的 TLPFG 具有更高的环境折射率灵敏度; 当包层半径增加到一定数值后, 增长率随包层半径的增大而趋于 0, 有效折射率趋于稳定; 对于不同模式的包层模, 模式数较小的包层模的有效折射率要大于模式数较大的包层模。

在包层半径为 $60 \mu\text{m}$ 时, TLPFG 不同包层模式 LP₀₂、LP₀₃ 和 LP₀₄ 的有效折射率随外界环境折射率变化的规律如图 3 所示, 环境折射率从 1.35 开始, 每次增加 0.01 RIU, 直至 1.44。可以看出, LP₀₂、LP₀₃ 和 LP₀₄ 的有效折射率均会随着环境折射率的增加而增加, 且随环境折射率的增加有效折射率的变化效果更加显著, 当环境折射率与包层折射率近似相等时, 各包层模式先后发生截止, 且 LP₀₄ 会率先截止。在同样的外界环境折射率的变化范围内, 各阶包层模的环境折射率灵敏度也有所不同, 在变化相同的 0.01 RIU 时, LP₀₄ 的有效折射率的变化要比 LP₀₂ 更明显, 即高阶的包层模具有更高的环境折射率灵敏度, 说明光纤对于高阶的包层模的束缚能力更弱, 高阶包层模更容易被耦合到

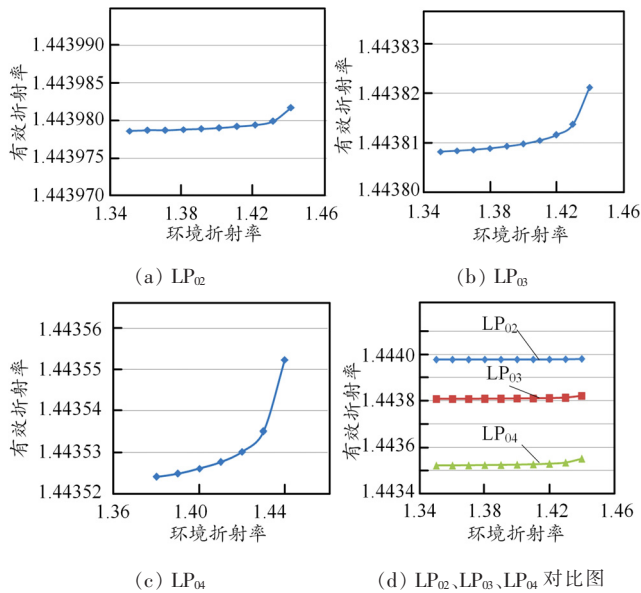


图3 不同包层模式的有效折射率与环境折射率的关系

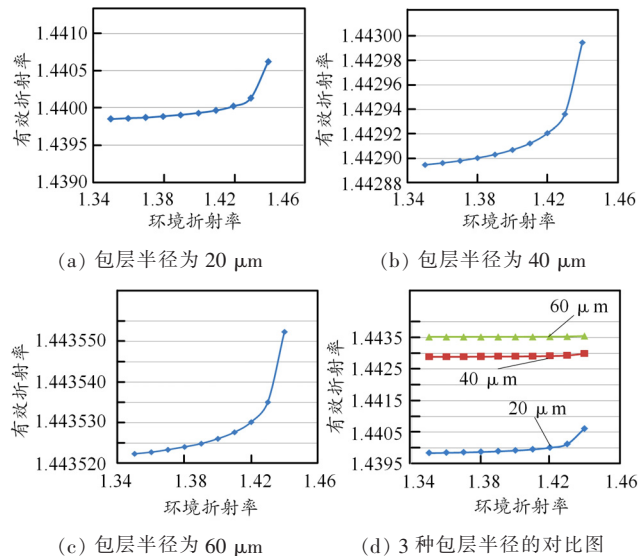
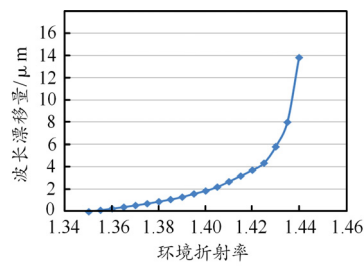


图4 相同包层半径的有效折射率和环境折射率的关系

外界环境中,从而使得 TLPFG 的折射率灵敏度更高。

同一高阶包层模式 LP_{04} 分别在半径为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}$ 时环境折射率与包层有效折射率之间的曲线关系如图 4 所示。可以看出,环境折射率变化范围相同时,不同包层半径的光纤具有不同的折射率灵敏度。在环境折射率均在 $1.35\sim 1.44$ 的范围中变化时,包层半径为 $20\ \mu\text{m}$ 的光纤有效折射率变化量为 0.000772 , $40\ \mu\text{m}$ 变化量为 0.0000996 , $60\ \mu\text{m}$ 变化量为 0.00003 ,说明包层半径更小的光纤有效折射率的变化幅度更大,即灵敏度更高。

设定包层半径为 $20\ \mu\text{m}$, 其它参数不变情况下得到的 LP_{04} 模式谐振波长漂移量与环境折射率的变化曲线如图 5 所示。可以看出,TLPFG 在环境折射率逐

图5 LP_{04} 模式谐振波长漂移量与环境折射率的变化曲线

渐增大的过程中,高阶谐振波的漂移量也在逐渐增大,且呈非线性变化。环境折射率较低时,高阶谐振波长的灵敏度较小,线性度较高;环境折射率较高时,高阶谐振波长的灵敏度明显

提高,但同时线性度变差。因此,在实际的应用中根据具体需求,动态选择合适的 TLPFG 线性关系,即需要在灵敏度与线性度之间做出权衡。

3 结束语

本文对 TLPFG 的折射率传感特性进行了研究,采用数值仿真方法讨论了 TLPFG 包层模式的有效折射率和谐振波长随外界环境折射率的变化关系。仿真结果表明:半径越小的包层模式灵敏度越高,且环境折射率的变化会影响高阶谐振波环境折射率的灵敏度及线性度。因此,在实际应用中可以通过设置环境折射率、包层半径等参数来调整谐振波波长的漂移量,从而满足不同的灵敏度测量需求。此外,本文的研究对于 TLPFG 在折射率传感领域的设计和优化也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] ZHANG X, PENG W, LIU Y, et al. Core-cladding mode recoupling based fiber optic refractive index sensor [J]. Optics Communications, 2013, 294: 188–191.
- [2] JIANG Qi. A comparison study of the sensing characteristics of FBG and TFBG[J]. Sensor Review, 2013, 33(1): 68–79.
- [3] 苗银萍,刘波,赵启大. 不同包层半径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J]. 光学学报, 2008(11): 2072–2076.
- [4] 陈青云,石胜辉,张旨遥,等. 包层腐蚀机械刻制长周期光纤光栅的耦合特性研究[J]. 光电子激光, 2011, 22(5): 677–680.
- [5] 陆建国,顾铮先,高侃. 级联倾斜长周期光纤光栅传输谱特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 159–167.
- [6] 金清理,黄晓虹,颜利芬,等. 长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1201–1204.
- [7] ENGLER D, PRASHAR S, MALIK S S. Dependence of ambient refractive index sensitivity with grating period of LPFG [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(3): 658–661.
- [8] 周艳,王天根,郭冰. LPFG 镀层参数对其折射率传感特性的仿真分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 99–103.
- [9] 韩志行. 新型结构长周期光纤光栅的传感特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.